研究論文

ICTを活用した遠隔技能伝承アシストシステムに関する研究開発（第2報）

五十嵐　晃*　中部　昇*　阿部　淑人**
大野　宏***　江口　和也*　山本　正信****

Research and Development of Remote Technical Skill Succession Support System with ICT II

IKARASHI Akira*, NAKABE Noboru* ,ABE Yoshito**,
OHNO Hiroshi***, EGUCHI Kazuya* and YAMAMOTO Masanobu****

抄　　録

新潟県内の中小製造業における研磨作業や刃付け作業は，作業者の経験と勘に頼るところが多く，技能の伝承が円滑に進んでいない現状がある。本研究では，ICT（情報通信技術）を用いて，熟練作業者の作業を数値化することで可視化し，初心者にもわかりやすい表示をすることにより，技能の伝承を円滑に進めるシステムの開発を行った。さらに作業現場で得られる作業計測データを，無線LAN 等のネットワーク経由で送信することで，遠隔地においても，作業現場と同様の情報を得られるようにし，遠隔地でも円滑に技能伝承できるシステムの開発を行い，現場作業者から好評を得た。

1. 緒　　言

本研究では，ICT を活用し熟練技能者（以下，熟練者）が持つ技能を，無線を介してセンシングして可視化し，これを利用して技能を円滑に初心者に伝える伝承アシストを開発する。対象は金属製品の研磨作業と作業工具の刃付け作業とする。金属製品の光沢や作業工具の刃先の形状をわかりやすく表示し，熟練者しかできない動きや力の入れ方を抽出して可視化する。さらに得られたデータをネットワーク経由で遠隔地へ伝送することで，遠隔技能伝承アシストシステムを実現する。これにより，技能伝承に要する時間を従来の 1/10 に短縮することを目指す。以上をもって，熟練技能の次世代への伝承と地場産業のさらなる発展に貢献する[1)2)3)4)]。

本研究は平成 22～23 年度の事業であり，今年度は，全体システムの確立を目指した。

*　　研究開発センター
**　　下越技術支援センター
***　企画管理室
****　新潟大学工学部情報工学科

2.　研究概要

2.1　金属製品を研磨した面の光沢測定に関する研究開発（熟練作業の評価基準も含む）

2.1.1　概要

研究計画では，金属製品の研磨部品について，JIS Z8741 に準拠した光沢度計による光沢測定法に対して新規に考案した平行光源と光線空間カメラによる光沢分布特性測定法によって計測時間の短縮化と測定密度の向上を目指した。

2.1.2　提案システムの概要

提案システムは既存の光沢測定規格との互換性（測定値の一致など）を考慮した上で，非接触測定機能を実現することとイメージング機能つまり空間分布特性取得機能を付与することを目指して開発した。カメラには撮像素子として 2,560×1,920 = 4,915,200 画素の CMOS イメージセンサが搭載され，その受光面に約 6,000 個の

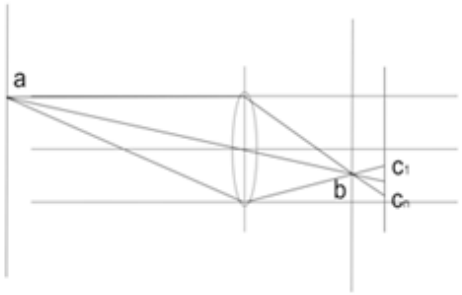


図 1　結像光路

マイクロレンズがハニカム状に配置されたレンズアレイを搭載している。このマイクロレンズ毎に各微小部分（以下セルと言う）の光線方向と光線強度が約 530 画素（半径 13 画素の円状）に分離して取得される。図 1 に結像光路の模式図を示す，a 点の鏡像が中央の主レンズを介して b 点に結像する様子を示している。通常のカメラでは b 点を含む結像面に撮像素子を搭載するが，ここにマイクロレンズアレイが搭載されているため後方に再度光線を配光し C1～Cn の多画素として撮像する。

測定手順としては，まず照明系，受光系をセッティングし，校正基準となるミラー光沢基準板を撮像して基準値として保存する。次に測定対象を撮像して基準値（20°グロス値が 1,856 であり，光沢度は反射率にすると 92.8%）で除算して照明ムラや感度ムラなどの影響を除外する。基準値が 92.8％であるため除算後に 92.8%を乗算すると求める反射率が得られる。但し，測定単位は画素そのものではなく，約 6,000 個のセル単位である。

各セル単位には様々な光線方向からの輝度が約 530 画素に渡って分布しているため，ここから平均値，標準偏差，最大値，最小値を算出することとした。

2.1.3　実験結果

昨年度評価した熟練者と初心者の研磨サンプルを同様に撮像し，拡張ダイナミックレンジ処理 [5]と，校正処理を行い，その単純濃淡画像から先ほど述べたようにセル単位の計算を行った結果を図 2 と図 3 にそれぞれ示す。また，熟練者，初心者の今年度と昨年度の反射率結果を表 1 に示す。今年度と昨年度の結果を比較すると，熟練者も初心者も平均値は概ね一致したことが分かる。また，図の右部分にカラーバーを示し各セル位置の色が鏡面反射率を表している。またカラーバーの左部には頻度分布を示している。

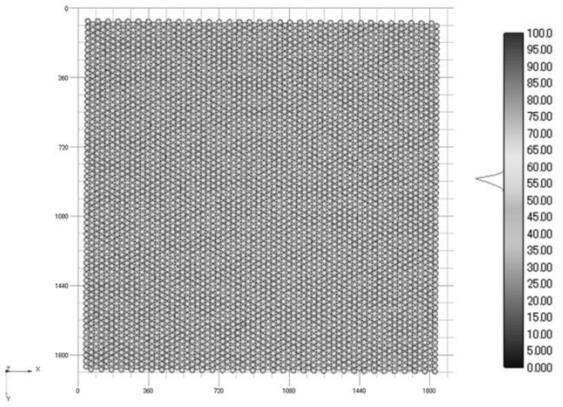


図 2　熟練者の研磨結果

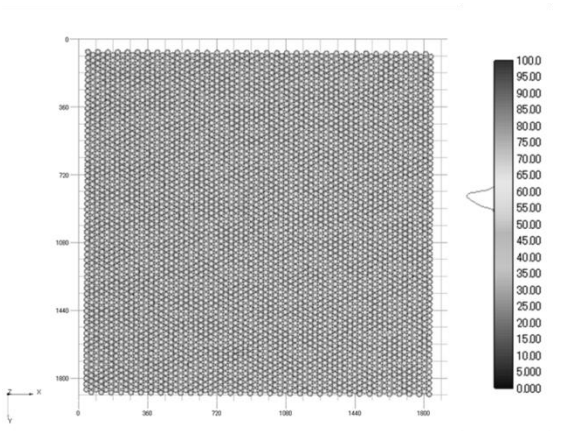


図 3　初心者の研磨結果

表 1　熟練者と初心者の光沢計測結果

		平均	標準偏差
熟練者	今年度結果	56.02	1.0966
	昨年度結果	56.07	0.2300
初心者	今年度結果	57.96	1.5271
	昨年度結果	56.57	0.8400

熟練者のほうが狭く尖った分布であり一様な研磨結果となっていることが分かる。

2.1.4　考察

提案した光沢度測定システムにより，小面積かつ平坦板に限られるものの 1 回の撮像で 3 分以内に 4,000 サンプル以上の反射率分布を測定できるようになった。現時点では 1 回の撮像面積が 30mm×30mm 程度であるため大面積に適用するには移動機構が必要である。また光沢度計と異なり非接触測定であるため将来的には大面積や造形物への適用にも可能性がある。

2.2　作業工具の刃先の三次元形状測定に関する研究開発

2.2.1　概要

ニッパの製造工程では，最後に熟練者がヤスリがけをして刃の切れ味を整える刃付け作業を行う。これらの技能伝承を支援するために，刃先の三次元形状を高速かつ高精度に測定して表示するシステム [6]を開発した。また，熟練者と初心者では刃先の形状がどう違うか調べ，熟練度を数値で表し，技能の習熟度を把握できるようにした。

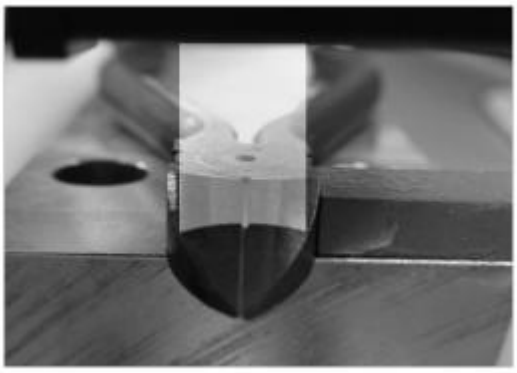


図 4　開発したシステムでの三次元形状測定

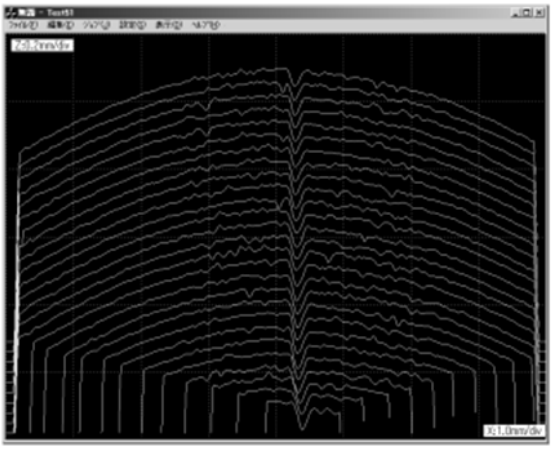
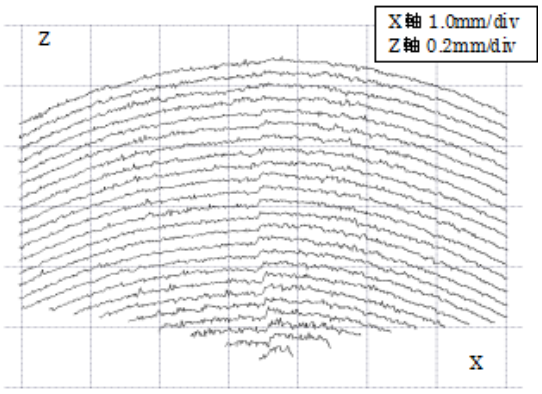
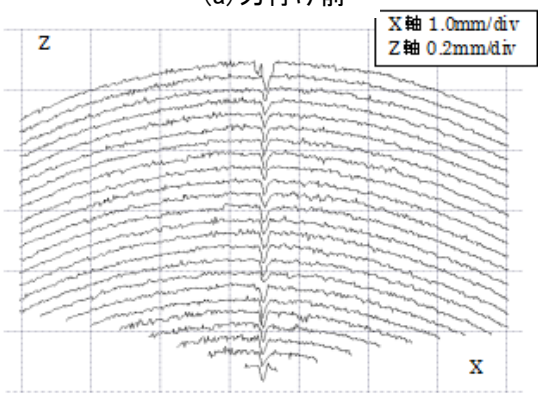


図 5　三次元形状測定例

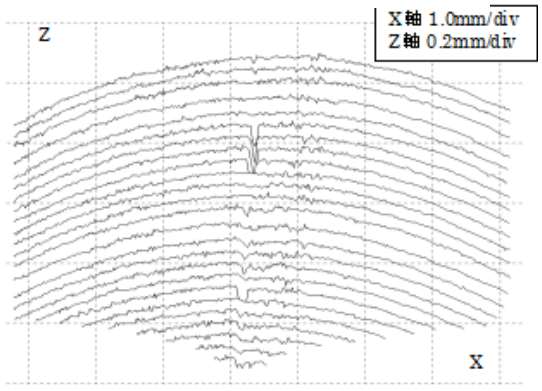
2.2.2　測定システムの構成



(a) 刃付け前



(b) 熟練技能者の刃付け後



(c) 初心者の刃付け後

図 6　ニッパの三次元形状

開発したシステムでニッパの刃の三次元形状を測定している様子を図 4 に示す。1 軸方向に移動する電動シリンダー（IAI 製 ERC2）の上にニッパを設置し，少しずつ移動させながらその形状を高精度二次元変位センサ（キーエンス製 LJ-G015K）で測定する。パーソナルコンピュータにその結果を表示し，測定に要する時間は約 20 秒である。電動シリンダーを制御し，変位センサからの信号を取り込んで刃先の三次元形状を表示するプログラムを C 言語で作成した。三次元形状測定の結果例を図 5 に示す。

2.2.3 熟練度の評価基準

刃付け作業前と熟練者が刃付けした後および初心者が刃付けした後の，ニッパの表側の刃先の三次元形状の測定結果を図 6 に示す。図からわかるとおり，刃付け前は左右の刃に段差があるが，刃付け後はこの段差がなくなり，左右の刃の接するところが少し下がり鋭くなっていることがわかる。また，その下がり方も熟練者は刃全体で均一になっているが，初心者はばらつきがある。まさにこの部分が刃付け作業で作業者がヤスリをかける部分であり，この刃先の下がり方の均一さは熟練度により差が生じる。そのため，左右の刃が接する箇所の刃の形状の均一さを技能の熟練度の評価基準とする。この値が小さいほど熟練度は高い。

具体的な熟練度の計算方法を以下に示す。測定した刃先の三次元形状において，N 個の波形の平均を式（1）で求め，

$$\bar{f}(x)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f_i(x) \qquad (1)$$

各部の波形が平均波形からどれだけ異なっているか，左右の刃が接する前後 0.2mm の範囲の合計 d を（2）式から計算する。

$$d=\sum_{i=1}^{N}\int_{-l}^{l}\left|f_i(x)-\bar{f}(x)\right| \qquad (2)$$

この値が小さいほど，左右の刃の接する部分の形状は均一となり，作業者の熟練度は高いと言える。

表 2　熟練度の計算結果

	サンプル番号	熟練度の評価基準
初心者	1	12.39
	2	16.38
	3	15.57
中級者	4	7.60
	5	8.53
	6	5.45
上級者（熟練者）	7	4.13
	8	4.28
	9	4.25

2.2.4 熟練度の測定結果

初心者，中級者，上級者（熟練者）がニッパの刃付け作業をした後の，刃の三次元形状の左右の刃が接する部分を比較すると，刃の形状は初心者ほどばらつきがあり，上級者ほど均一になっていることがわかる。また，中級者は形状が似ているもののくぼみの大きさが場所によって異なり，くぼみも大きい。一方，上級者はくぼみは小さく均一である。

式（2）から計算した熟練度を表 2 に示す。初心者，中級者，上級者とも，3 丁ずつ測定した。技能が高いほど，左右の刃が接する部分の三次元形状が均一で，平均波形からの差分は小さくなった。中級者が刃付けをしたサンプル 6 は 5.45 と熟練度が高く，上級者に近い結果となった。

2.3 研磨と刃付け作業における人の動きと力のかけ方の測定に関する研究開発－マーカ式モーションキャプチャ

2.3.1 研磨作業システムの構成変更

バフ研磨作業における工作物（ワーク）の動かし方と力加減（力覚）をモニターする装置に

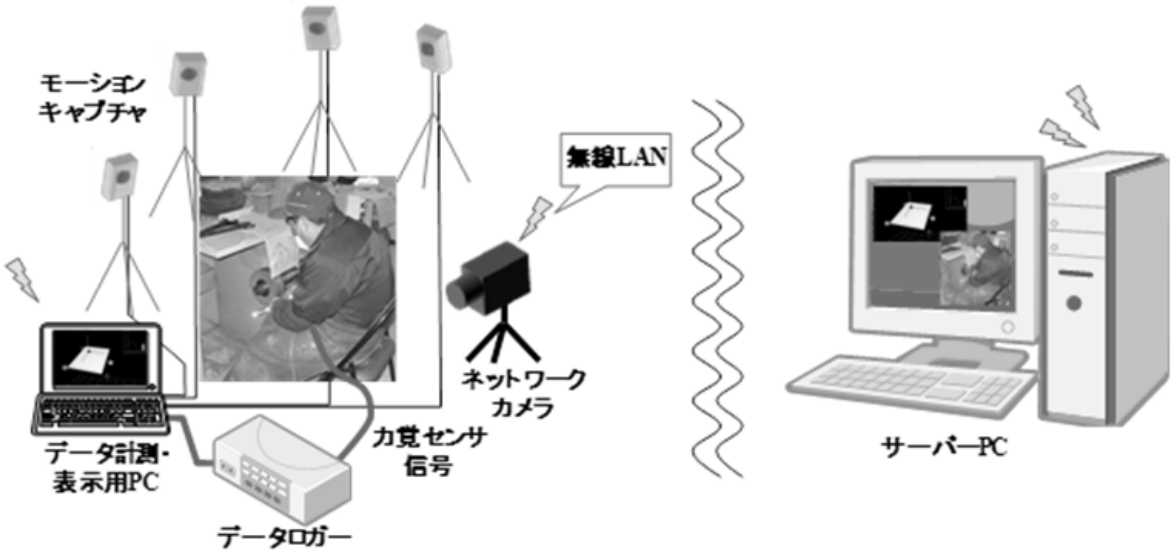


図 7　研磨作業における遠隔技能伝承支援システム

ついてソフトウエアの改良を行い，前年度の課題であるデータ取得時間を短縮し，結果として 1 秒当たり 30 フレームの計測，およびリアルタイムでのワーク位置・姿勢，力覚，研磨推定量の結果表示を可能とした。加えて，バフ研磨作業における遠隔技能伝承支援システムとして，これらの情報を無線 LAN によって，ネットワークカメラを用いた作業時の動画像伝送と合わせて遠隔地のパソコンに伝送するシステムを構築した。図 7 に構築した研磨技能伝承支援システムを示した。

2.3.2　熟練作業の評価基準

熟練者と初心者による平板の研磨作業を比較することにより，両者の技能の特徴を調べた。両者のワークの動かし方のパターンが周期的であることに着目し，周期毎のワークへの作用荷重やバフに対するワークの姿勢の変動を評価した。その結果，作用荷重の垂直方向分力であるワーク押し付け荷重の大きさやその 1 周期内における変動，およびバフ研磨面に対するワークの傾きの変動が共に熟練者が初心者に比べて大幅に少ないことが確認され。そのため，この場合の押し付け荷重およびその変動や，バフに対するワークの姿勢の変動の大小が熟練度の評価基準となると考えられた [7)]。

2.3.3　遠隔技能伝承支援システムの開発

自習も可能な技能継承支援システムの開発を考慮すると，前節で示した評価基準パラメータを直接数値データやグラフにより表示しても研修生や指導者に直感的に情報が伝わるとは言い難く，自らの作業状態を把握するためにはより直感的な教示方法が求められる。昨年度において提案した研磨量推定値の分布は，仕上がりの良否がワークの各領域を如何に均等に，かつ均一の力でバフに接触させるかに起因するとの仮説を基に，モーションキャプチャで測定したバフに対するワークの位置からワークーバフの接触領域を求め，さらにその際にワークに作用する力を考慮することによって，作業中におけるワーク各領域の研磨量を推定するものである。例えば，熟練度の評価基準とした押し付け荷重やワーク姿勢の変動は，ワーク全体における研磨量推定値の不均質な分布の要因となり，また過大な押し付け荷重は研磨量推定値の増加として表されることから，研磨量推定値分布は評価基準を反映しうると判断される。かつ，研磨量推定値分布は画像情報として認識され，さらには分布の色や均一度といった単純な情報で作業

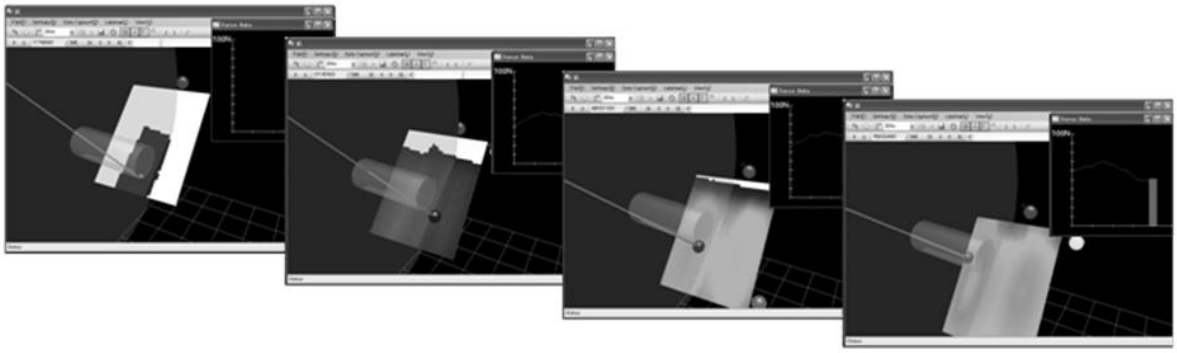


図 8　作業計測画面の一例

状態を把握できることから，初心者や熟練者に対し直感的に理解を促すものであり，教示情報として有効であると考えられる。以上のことから，先に示した作業計測システムにおいても計測中において研磨量推定値分布（瞬間値および積算値のいずれか）をリアルタイムに計算し，図 8 に示すようにワークの姿勢や力覚情報と併せてコンピュータ画面上に表示できるようにした。

改良した作業計測システムにより研磨加工の現場で実際に作業測定を行い，作業者から意見を伺ったところ，熟練者・初心者とも自分の力加減が適切であるか，また，均等にワークを研磨できているかを容易に理解できるとの評価を得た。

2.4　研磨と刃付け作業における人の動きと力のかけ方の測定に関する研究開発－マーカ無しモーションキャプチャ

2.4.1　熟練手作業

マイクロニッパの製造工程における熟練者の手作業である，刃付け作業に注目した。刃付け作業は最も熟練者の作業が必要な工程である。この工程は，円滑調整，目視検査，切れ味検査および刃の修正という 4 つの作業単位の組み合わせから構成されている。円滑調整では，ニッパの開閉がスムーズに行えるよう，左右のアームを留めているリベットをハンマーで叩いて調整する。目視検査では，ニッパを閉じたとき，二つの刃の一致・不一致を判定する。切れ味検査では，銅線を試し切りし，切れ味により刃のスキマやかぶり具合を調べる。これらの検査で刃の不具合が見つかれば，砥石により刃の修正を行う。このとき，刃に対する砥石の当て具合，こすり具合が重要である。これらの作業単位を繰り返しながら，初心者は 2〜3 分，熟練者なら約 1 分で刃付け作業を終える。

2.4.2　手のモーションキャプチャ

ニッパの製作工程のなかで，刃付け作業における手・指の動きを測定することにした。人間の動作を測定し，コンピュータグラフィックスにより再現するシステムはモーションキャプチャと呼ばれている。身体の腕や脚の動きを測定するモーションキャプチャ [8]は多く見られるが，今回は手・指の動きを測定するモーションキャプチャ [9]を開発することとした。

2.4.2.1　作業環境

作業者は立位で作業机に向かう。作業机上には，万力，砥石，ヤスリ，金床，ハンマー等の工具が置かれている。作業机は上方から十分な明るさの蛍光灯が照射されている。また，前方にも蛍光灯が置かれ，目視検査に利用される。作業者は軍手を付けて作業を行う。両手の作業空間は約 50 センチ立方メートルである。

手・指の動きを測定するモーションキャプチャとして，データグローブが市販されているが，特殊なセンサやデバイスを装着することは，微妙な熟練作業に過剰な負担を負わせる恐れがあるため，ビデオカメラによる非接触測定を試み

ることにした。

指の動きを三次元的に測定するためには，複数の視点に配置されたビデオ映像が必要となる。特に，ワークや工具，他方の手により手・指が隠されることもある。そのため，出来るだけ多くのビデオカメラを配置するのが良いが，照明器具の配置も重要であり，設置台数や位置も制限される。

熟練者は初心者に比べて約 2 倍の作業量をこなす。そのため，手や指の動きはかなり速い。ビデオ映像から手・指を確実に追跡するためにはフレーム間の動きが小さい方が良い。通常のビデオ映像は秒間 30 フレームであるが，この撮影速度ではフレーム間でかなりの大きさの手の動きが見られた。そこで，秒間 120 フレームが撮影可能なビデオカメラを購入し，使用することにした。

撮影のフレームレートが高くなると，フリッカーが問題となる。そこで，この問題を回避するために，照明を全て高周波点灯（インバータ点灯）とした。

図 9 は，刃付け作業を行っている作業環境の全景である。画面中央からやや右寄りに熟練作業者が後ろ向きに立って作業を行っている。カメラは，正面に 1 台，ステンレスパイプ枠に取り付けられた 2 台のカメラが上方向から撮影している。作業者の左手には 3 台，右手には 2 台のカメラが三脚に載せられて配置されている。作業者前方に下にスキマ検査用の蛍光灯，上方の蛍光灯に加え，天井に近い位置からハロゲンランプを使って作業机を照射している。

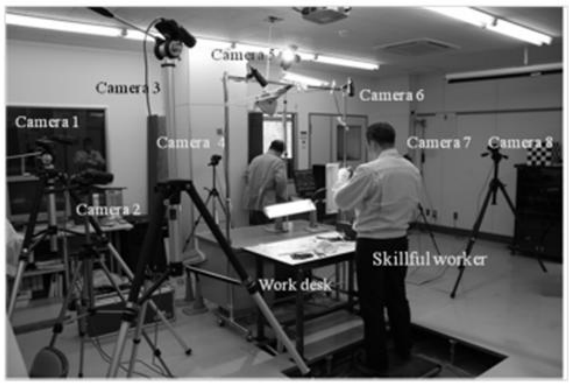


図 9　作業環境の様子

2.4.2.2　多視点カメラシステム

高速度 IEEE1394 ビデオカメラ（Flea3，Pont Gray）8 台をパーソナルコンピュータ（Windows 7，64bit，Intel Core i7）に 4 枚の PC 拡張ボードを介して映像を入力している。秒間 120 フレームの画像が 8 台のカメラから撮られる。画像はカラーでサイズは 640×480 画素 256 階調である。情報量が非常に多くなるため，動画をメモリに一時的に蓄積し，HDD に転送した後，オフラインで動画像の解析を行うこととした。パーソナルコンピュータには 64GB のメモリを搭載している。メモリには RAW 画像で保存されるため，約 20,000 フレームの画像が保存可能である。これは約 3 分の動画像が保存可能であり，熟練者の作業時間が約 1 分，初心者の作業時間が約 2 分であるので，両者の実演を 1 度に録画可能である。

2.4.3　手のモデルベーストラッキング

身体の多関節物体の動作解析は，身体の三次元多関節モデルを画像に照合させることが一般的である。ここでは，手の多関節モデルを多視点画像に照合させることにより，手の三次元姿勢を得る。刃付け作業では，背景が作業者の衣服であり，工具が乱雑に置かれた作業机であり，さらにその背景自体も変動する。手が工具やワークを握るとき指先が隠されることも多い。これらの影響で，これまでの画像認識手法による手・指の自動認識は難しいため，画像上の指の位置を教示することにした。

多視点からの画像上でそれぞれの指の位置が得られたら，手・指の三次元姿勢が決定できる。画像フレームの順番に三次元姿勢が得られれば手・指の動作を追跡したことになる。ここで，動画像解析ではキーフレームで身体の三次元姿勢を与えることが出来れば，キーフレーム間は比較的容易に自動追跡が可能であるため，本研

図 10　手の動作の追跡結果

究では，この手法を手の動作解析に使用する。すなわち，キーフレームで指の姿勢を教示しキーフレーム間は自動追跡を行うことにした。

2.4.4　追跡結果

熟練者の刃付け作業を追跡した結果を図 10 に示す。刃の修正を行っている。全部で 460 フレームのうちの 1 コマである。右手のモデルが赤いワイヤーフレームで表示されている。

モデルが全てのカメラからの手の画像と一致しているので，手の姿勢は三次元的に正確に得られている。このモデルは掌を最上位の部位とする多関節構造である。掌から指先に至るリンク構造では，関節の開き角度によって手の姿勢が，また，その時間変化により手の運動が定量的に記述されている。

図 11　距離画像による動きの追跡結果

2.4.5　リアルタイムトラッキング

より高速なモーションキャプチャを実現するために，距離画像データを解析して動作を計測した。距離画像を取得には，距離画像センサ Kinect（日本マイクロソフト（株））を使用したが，解像度が 640×480 ピクセルで距離分解能も数ミリメートルと高性能である。また，人体，胴，腕，脚の動きを計測する機能もあるが，今回は研磨用の金属製平板の動きを計測するプログラムを作成した。動きの追跡結果の一例を図 11 に示す。隠れがない理想的な状態での計測であるが，毎秒約 10 フレームの計測を行うことができた。さらに高速な計測を行うためには，マルチコア CPU の PC や GPU による並列処理が必要になる。

2.5　まとめ

以上，各要素技術についての成果を述べた。各要素技術については，おおむねほぼ目標が達成できた。研究開始当初は，これらの各要素技術をまとめて遠隔技能伝承システムを構築することを想定していた。しかし，研究を進めていくなかで，本研究において作業対象とした，研磨作業に対して，最適な要素技術を取捨選択して組み合わせることで，システムを構築することが適切であるとの判断にいたった。そのため，上述の 2.3 で述べたシステムを構築することで，遠隔技能伝承システムとした。また，これを用

いた実証試験を行った結果，熟練者，初心者のいずれも当該作業に関わる方々から「作業がわかりやすく表現されている」と好評を得た。

このように，技能の伝承に必要な情報を可視化し，客観的な表現を加え，かつ，ICT を適用することで，遠隔地においてもほぼリアルタイムで，同様の画面を確認できるようにすることが可能となった。これをもって，技能伝承の期間短縮を想定しているが，実際の期間計測には，まだ時間がかかるため，具体的な短縮度合いの確認は今後の課題としたい。

3. 結　　言

(1)輝度分布画像から局所平均反射率分布，局所拡散率分布，光沢方向分布を算出する方法を考案し，従来の方式に比べて 10 分の 1 以下の測定時間で，より多彩な情報を精細に取得できることが可能となった。

(2)作業工具のニッパの製造工程において，刃先の三次元形状を計測解析し，その熟練度を数値化した。

(3)バフ研磨作業における遠隔技能伝承支援システムとして，これらの情報を無線 LAN によって，ネットワークカメラを用いた作業時の動画像伝送と合わせて遠隔地の PC に伝送するシステムを構築した。

(4)刃付け作業において多数カメラの同時撮影で行ったマーカー無しモーションキャプチャーでは，技能伝承に必要な手作業に絞った解析を行い，8 台のビデオカメラから秒間 120 フレームの高速度画像入力を達成した。

(5)研磨作業において，距離画像センサを用いてマーカー無しモーションキャプチャーを行い，1 秒当たり 10 フレームのモーションキャプチャーが可能となった。マルチ CPU のコンピュータで並列処理を行えば，1 秒当たり 20 フレームのモーションキャプチャーが行える見通しが立った。

なお，本研究は，平成 23 年度総務省戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE）の委託を受けて行った。

参考文献

1) 五十嵐，大野，他，“新潟の匠の技を継承し発展させるための計測と制御に関する研究調査”，工業技術研究報告書，37，2008，p.24-26.

2) 五十嵐，大野，他，“匠の技を継承し発展させる技能伝承支援システムの開発”，工業技術研究報告書，38，2009，p.62-66.

3) 五十嵐，今泉，他，“匠の技を継承し発展させる技能伝承支援システムの開発（第 2 報）”，工業技術研究報告書，39，2010，p.75-79.

4) 五十嵐，今泉，他，“ICT を活用した遠隔技能伝承アシストシステムに関する研究開発”，工業技術研究報告書，40，2011，p.38-40.

5) 阿部，“露出ブラケット画像融合による拡張ダイナミックレンジ画像の生成”，電子情報通信学会信号処理シンポジウム，2011，p274-278.

6) 大野，五十嵐，“レーザ変位センサを利用した刃付け作業の技能伝承支援システムの開発”，ビジョン技術の実利用ワークショップ，2011，p163-164.

7) 中部，五十嵐，“バフ研磨作業における技能伝承支援システムに関する研究”，日本機械学会 SHD2011，2011，p476-480.

8) 佐藤，山本，他，“多視点カメラモーションキャプチャによる熟練技能センシング”，2011 年電子情報通信学会総合大会， 2011，p.179.

9) 大澤，山本，“多視点高速度カメラによる熟練手作業のモーションキャプチャ”，電子情報通信学会総合大会，2012，p167.